



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

CORRECCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD
TÉRMICA DE DISEÑO FIJADA POR EL CÓDIGO
TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN PARA
MATERIALES DE FACHADA EN GALICIA

CORRECTION OF THE DESIGN THERMAL CONDUCTIVITY
ESTABLISHED BY THE SPANISH TECHNICAL CODE FOR
FACADE MATERIALS IN GALICIA (SPAIN)

Autor/es

Daniel Gaña Montesinos

Director/es

José María Pérez Bella

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Septiembre 2016

DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. DANIEL GAÑA MONTESINOS

con nº de DNI 76921163-D en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
GRADO, (Título del Trabajo)

CORRECCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD
TÉRMICA DE DISEÑO FIJADA POR
EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN
PARA MATERIALES DE FACHADA EN
GALICIA

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 22 de Septiembre de 2016

Fdo: _____

AGRADECIMIENTOS

Con estas líneas me gustaría dejar constancia de mi gratitud hacía todas aquellas personas que, de alguna manera, han hecho posible que alcance mi sueño de ser ingeniero.

En primer lugar al profesor D. José María Pérez Bella, director de este proyecto, por haberme ayudado en todo momento ante cualquier duda, y por supervisar mi trabajo diario y este documento como si fuese suyo.

A Sergio Gracia Coloma, David Gundín Melero, Alberto Jaqués Carnicer, y Carlos Larraga Armisén, por haber compartido este duro trayecto desde el principio hasta el final, lleno de altibajos, pero que gracias al trabajo en equipo hemos podido superar.

De forma muy especial a mi familia, que siempre creyeron en mí, incluso en los momentos más difíciles.

Por último a Laura, por animarme a empezar este viaje cuando parecía una locura, por felicitarme en los buenos momentos y levantarme del fondo en los malos, y sobre todo por darme el impulso necesario para seguir adelante durante estos años.

Sin la ayuda de todos ellos esta meta habría sido inalcanzable.

RESUMEN: CORRECCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE DISEÑO FIJADA POR EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN PARA MATERIALES DE FACHADA EN GALICIA

Para el diseño de los parámetros prestacionales de conductividad y resistencia térmica que caracterizan a los cerramientos verticales utilizados en los edificios españoles, es el Documento Básico HE 1 (Limitación de la demanda energética), perteneciente al CTE, el encargado de definir unos valores fijos de temperatura y humedad relativa, ignorando el impacto que tiene la variación de las condiciones climatológicas en el cálculo de dicha prestación térmica.

La norma UNE-EN ISO 10456:2012 establece un proceso de cálculo para corregir el error cometido por el CTE, pero resulta demasiado complejo y laborioso. Con el fin de solucionar este problema, se ha desarrollado un procedimiento funcional y aproximado, basado en la ISO, que permita la corrección en el cálculo de la prestación térmica para cerramientos utilizados en Galicia, gracias a la aplicación de una serie de simplificaciones y a un análisis exhaustivo de las mediciones climáticas obtenidas en estaciones meteorológicas gallegas.

Una vez obtenido el parámetro corrector a aplicar, y pensando en dar más funcionalidad al método para el proyectista, se han realizado una serie de mapas donde se aprecie el factor a aplicar en cualquier punto de forma rápida y sencilla.

Para dar validez a la metodología, se ha escogido un tipo de cerramiento real y a partir de él se ha calculado la prestación térmica según tres criterios: el del CTE, el del factor corrector desarrollado, y el de la ISO. Analizando y comparando los datos obtenidos, se ha verificado que al aplicar el factor de corrección se consiguen valores mucho más ajustados que los obtenidos con el CTE, avalando por tanto su eficacia.

Por último, se ha decidido estudiar la efectividad de la metodología con las condiciones más adversas. Escogiendo el día del mes más caluroso en la estación con mayor factor corrector obtenido y tras los cálculos pertinentes, se ha comprobado que el método no corrige óptimamente los parámetros, pero aplicando un coeficiente de seguridad a dicho factor se conseguiría cubrir los momentos más extremos para la situación de trabajo de los cerramientos.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS	3
3.	ALCANCE.....	4
4.	CARACTERIZACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS CERRAMIENTOS EN GALICIA.....	5
4.1	APROXIMACIÓN AL FACTOR DE CONVERSIÓN TEMPERATURA.....	6
4.1.1	DIFERENCIA DE TEMPERATURA RESPECTO AL CTE	6
4.1.2	COEFICIENTE DE CONVERSIÓN DE TEMPERATURA	7
4.1.3	DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN DE TEMPERATURA	9
4.2	APROXIMACIÓN AL FACTOR DE CONVERSIÓN DE HUMEDAD	9
4.2.1	DIFERENCIA DE CONTENIDO DE HUMEDAD RESPECTO AL CTE.....	10
4.2.2	COEFICIENTE DE CONVERSIÓN DE HUMEDAD	14
4.2.3	DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN DE HUMEDAD	15
4.3	DETERMINACIÓN DE LA PRESTACIÓN TÉRMICA DE DISEÑO.....	15
5.	REPRESENTACIÓN GRÁFICA EN MAPA DE GALICIA DE LOS DATOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS	16
6.	VERIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA.....	19
7.	ANÁLISIS DETALLADO DE LA FUNCIONALIDAD BAJO CONDICIONES ADVERSAS	24
8.	CONCLUSIONES.....	26
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	28

TABLA DE ANEXOS

ANEXO I: TABLAS CON LOS PARÁMETROS GEOGRÁFICOS Y LOS FACTORES DE CORRECCIÓN RELATIVOS A LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS ESTUDIADAS..... 30

ANEXO II: FICHAS DETALLADAS CON LOS CÁLCULOS Y RESULTADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LOS DATOS PROPORCIONADOS POR LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS ESTUDIADAS..... 33

ANEXO III: MAPAS CARACTERIZADORES DEL FACTOR CORRECTOR A APLICAR EN CERRAMIENTOS DE GALICIA..... 95

ANEXO IV: CURVAS DE SORCIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO DE LA CARACTERIZACIÓN DEL CERRAMIENTO SELECCIONADO..... 99

1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista del aislamiento térmico en cualquier tipo de edificación, uno de los puntos clave a tener en cuenta en el diseño previo es el cerramiento, ya que se trata de la superficie por la que más transmisión de temperatura se produce y la principal barrera de protección contra el ruido externo.

Un adecuado diseño de esta parte de la estructura será por tanto fundamental a la hora de conseguir un edificio cuya demanda energética sea lo más reducida posible y, además, permita dotar a los usuarios de un adecuado confort interior.



Figura 1. Distribución general de pérdidas energéticas en un edificio. (Fuente: [1])

La prestación térmica de los cerramientos se ve influenciada por varios factores ambientales (temperatura, humedad relativa, lluvia, radiación solar, etc.), que pueden aumentar o disminuir la capacidad aislante de los materiales utilizados, y a su vez afectar al valor de la conductividad y resistencia térmica global ofrecida por la envolvente. Por ello, una variación de las condiciones climatológicas tiene como consecuencia una desviación en la prestación del cerramiento que ha de considerarse.

Para evaluar estas variaciones de forma aproximada, el CTE establece unas condiciones de diseño fijadas para todo el país en una temperatura de 10°C y con un contenido de humedad en el material, en equilibrio a 23°C y 50% de humedad relativa, según queda recogido en el Documento Básico HE 1, capítulo 6.1 [2]:

“En todos los casos se utilizarán valores térmicos de diseño, los cuales se pueden calcular a partir de los valores térmicos declarados según la norma UNE EN ISO 10456. En general, y salvo justificación, los valores de diseño serán los definidos para una temperatura de 10°C y un contenido de humedad correspondiente al equilibrio con un ambiente a 23°C y 50% de humedad relativa.”

Como se demostrará más adelante, si en el material se produce un incremento de temperatura y de contenido de humedad, de forma simultánea se genera una acentuación de la conductividad y un descenso de la resistencia térmica ofrecida por la envolvente del edificio.

Este hecho contrasta significativamente con las condiciones de diseño que marca el CTE en su Documento Básico, en las que no se tiene en cuenta ni la época del año (el cerramiento no se comportará de la misma forma en Enero que en Agosto), ni el emplazamiento elegido (no es lo mismo instalar el edificio en una zona costera que en una zona árida), lo que constituye cuanto menos en una aproximación poco precisa respecto al comportamiento real.

En la actualidad, para resolver este problema se hace uso de una herramienta de aproximación de cálculo definida en la Norma UNE-EN ISO 10456:2012 [3], mediante la cual se obtiene un coeficiente corrector que es dependiente del emplazamiento, de las condiciones meteorológicas, y de los materiales empleados en los cerramientos verticales de fachada, el cual se emplea para calcular los parámetros térmicos con un reajuste aplicado, obteniendo así valores mucho más próximos a la situación de trabajo.

A pesar de sus ventajas, esta norma es tremendamente laboriosa y compleja para el proyectista, por lo que no resulta funcional para su uso diario en el diseño de edificios. Por este motivo, el CTE establece como condiciones de diseño las mismas facilitadas por los fabricantes en sus catálogos de productos, obviando en todo momento la necesidad de aplicar el método de la UNE-EN ISO 10456:2012.

Por todo ello, encontrar una alternativa más eficiente y rápida a esta norma, garantizando su fiabilidad ante todo, se torna como un objetivo fundamental.

2. OBJETIVOS

Se busca analizar y aplicar un novedoso método de cálculo basado en los principios de la ISO 10456:2012, pero a su vez más simplificado, prestacional y funcional, utilizando únicamente registros de temperatura y de humedad relativa fácilmente obtenibles para los diversos emplazamientos.

Este método servirá para el análisis exhaustivo de las condiciones higrotérmicas en cerramientos verticales (fachadas) de una Comunidad Autónoma española en particular.

Para conseguirlo, se toman una serie de simplificaciones a la norma ISO que permitan que durante el proceso de cálculo que se va a desarrollar no se tenga en cuenta el tipo de material utilizado, sino una definición genérica de la composición del cerramiento habitual en España. Gracias a estas simplificaciones, se obtiene un factor corrector que multiplicado por el valor de conductividad establecido por el CTE, permite una aproximación más exacta a las condiciones higrotérmicas de la fachada bajo condiciones reales de operación.

Con el ánimo de garantizar la rapidez en el diseño del cerramiento vertical por parte del proyectista, se pretende representar en un mapa de la región pertinente y mediante un programa informático CAD, una serie de isolíneas a través de las cuales obtener con un simple vistazo el factor corrector a aplicar en cualquier punto de la región, para posteriormente multiplicarlo por la conductividad térmica inicial, ó en su defecto dividirlo por la resistencia térmica, obteniendo el dato prestacional.

Para dar validez a la aproximación de cálculo elaborada en este documento, a partir de un catálogo de materiales normalizado se elegirá un tipo de cerramiento vertical utilizado habitualmente en los edificios de nuestro país, y a partir de sus datos respectivos llevar a cabo el proceso de cálculo completo que define la propia la ISO 10456:2012, para posteriormente poder hacer una comparativa que muestre que criterio (el definido por el CTE o el desarrollado en el proyecto), se acerca más al valor óptimo y preciso que se consigue a partir de la aproximación que estipula la ISO.

Por último, realizará un análisis más detallado a partir de las mediciones ambientales diezminutales del día más desfavorable para los intereses del aislamiento del cerramiento, comparando sus resultados con el método general desarrollado, y analizando la viabilidad del mismo en uno de los casos más extremos a las que pueda estar sometida la envolvente del edificio.

3. ALCANCE

El ámbito de este proyecto está centrado en analizar la climatología y su efecto sobre los cerramientos verticales de las provincias de la comunidad autónoma de Galicia (A Coruña, Lugo, Ourense y Pontevedra).

Es la propia Consejería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia la encargada de recopilar estas mediciones históricas, que se recogen en cada una de las estaciones meteorológicas repartidas por todo del territorio gallego, y que se registran en su web correspondiente (www.meteogalicia.es) [4].

Dentro de todos los datos recogidos por cada estación (velocidad del viento, lluvia, radiación solar, etc.), el método a desarrollar necesitará únicamente las mediciones de dos de ellas: la temperatura media y la humedad relativa media.

A su vez, estas dos variables tienen registros de medias diezminutales, diarias o mensuales. En este trabajo se utilizan tanto registros mensuales en la primera parte del proyecto, como variables diezminutales en el análisis detallado final.

Para obtener un análisis óptimo de los datos que garantice un amplio registro de los mismos, se ha decidido filtrar el número de estaciones disponibles en el territorio gallego, empleando únicamente aquellas que contengan registros de 10 o más años ininterrumpidos, dando lugar a un total de 57 estaciones analizadas.

Respecto a los mapas de Galicia, y para analizar la variación en distintos casos, se pretende representar tres de ellos: uno que muestre las isolíneas con el factor corrector medio anual, otro con el factor máximo mensual, y un tercero con el factor mínimo mensual.

Para la parte de verificación y comprobación del método, se ha escogido para su estudio un tipo de cerramiento vertical característico de las viviendas construidas en el territorio español, escogido a partir del Catálogo de Elementos Constructivos del CTE [5].

En la última parte del análisis en detalle, se escogerá el mes con el factor corrector más elevado de todos los analizados (a condiciones ambientales más agresivas, mayor será el factor), y conociendo la estación pertinente se obtendrán los registros diezminutales del día más caluroso de dicho mes, haciendo un estudio valorativo y exhaustivo de los resultados obtenidos.

4. CARACTERIZACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS CERRAMIENTOS EN GALICIA

Para llevar a cabo la tarea planteada, es necesario definir en primer lugar la influencia que tienen las condiciones climáticas sobre las propiedades de transferencia térmica de los cerramientos.

Es en la norma UNE-EN ISO 10456:2012 donde quedan establecidos los parámetros que interactúan en la $\lambda_{\text{DISEÑO}}$, calculando la influencia de los materiales que componen la fachada en el valor de conductividad presentado.

En dicha normativa aparecen las siguientes expresiones que relacionan las condiciones teóricas de conductividad y de resistencia térmica que define el CTE (λ_1, R_1), con las condiciones de diseño aproximadas al comportamiento real (λ_2, R_2):

$$\lambda_2 = \lambda_1 * F_T * F_M * F_A$$

$$R_2 = \frac{R_1}{F_T * F_M * F_A}$$

Siendo:

F_T Factor de conversión de temperatura (-).

F_M Factor de conversión por contenido de humedad (-).

F_A Factor de conversión por envejecimiento. Se obtiene de valores experimentales para un tiempo de vida útil de 50 años. Generalmente, y en este estudio, toma el valor de la unidad (-).

Las ecuaciones utilizadas para obtener los factores de conversión son:

$$F_T = e^{f_T * (T_2 - T_1)}$$

$$F_M = e^{f_\psi * (\psi_2 - \psi_1)}$$

Siendo:

f_T Coeficiente de conversión de temperatura, variable según el material y conductividad del mismo, según valores tabulados en la propia norma para oscilaciones de 0°C a 30°C. (1/K)

f_{ψ} Coeficiente de conversión del contenido de humedad por unidad de volumen, según valores tabulados en la propia norma, para el rango de contenido de humedad admisible por cada material (m^3/m^3).

Aplicando las expresiones anteriores mediante los datos tabulados en la norma se puede verificar como conforme aumenta la temperatura y el contenido de humedad, se incrementa la conductividad térmica del material, lo que conlleva una menor resistencia térmica ofrecida por el cerramiento. Para conseguir que las fórmulas anteriores sean independientes de los materiales seleccionados y que únicamente dependan de las condiciones ambientales existentes a ambos lados del cerramiento, es necesario realizar una sucesión de simplificaciones.

4.1 APROXIMACIÓN AL FACTOR DE CONVERSIÓN DE TEMPERATURA

En el apartado anterior quedó definida la expresión para el factor de conversión que se asocia a cada emplazamiento, por lo que ahora se procede a la simplificación de cada una de las variables correspondientes.

4.1.1 DIFERENCIA DE TEMPERATURA RESPECTO AL CTE

Esta diferencia se establece entre la temperatura media mensual en el cerramiento (T_2), y los 10°C (T_1) de referencia que establece el CTE actualmente para cualquier material en España.

A su vez, dicha temperatura media (T_2) se obtiene mediante el promedio de la temperatura media mensual en el exterior y en el interior del cerramiento, siendo esta última de acuerdo al CTE de un valor constante de 20°C:

$$T_{med.cerramiento} = T_2 = \frac{T_{ext} + 20}{2}$$

, donde T_{ext} corresponde al valor suministrado por la estación meteorológica.

4.1.2 COEFICIENTE DE CONVERSIÓN DE TEMPERATURA

Como se ha visto en su definición, este coeficiente es fuertemente dependiente del tipo de material y de la configuración del cerramiento elegido, lo que trastoca el objetivo prioritario de obtener una metodología rápida y efectiva que dependa únicamente del valor de la temperatura y del contenido de humedad.

Por este motivo, es necesario desarrollar un conjunto de simplificaciones permitiendo que el factor corrector a obtener dependa únicamente de las condiciones climáticas, por lo que aunque el ajuste no sea estrictamente exacto, sí sea funcional y mucho más aproximado al comportamiento real que el proporcionado por el CTE.

La caracterización recogida en la norma para el valor de f_T oscila entre 0,001 y 0,0069 K^{-1} , dependiendo de si se trata de un elemento de albañilería ó un aislante térmico, respectivamente.

Para poder obtener un coeficiente de conversión promedio según los cerramientos comúnmente utilizados en nuestro país, se define la siguiente ecuación:

$$f_{T(\text{promedio})} = (f_{T(\text{aislante})} * \%_{\text{aislante}}) + (f_{T(\text{albañilería})} * \%_{\text{albañilería}})$$

En dicha norma, el valor para los materiales aislantes oscila entre 0,0026 y 0,0069 K^{-1} , por lo que adoptar un valor medio igual a 0,00475 K^{-1} supone una buena aproximación. De la misma forma, el valor para los elementos de albañilería oscila entre 0,001 y 0,003 K^{-1} , por lo que se elige un valor representativo de 0,002 K^{-1} .

En nuestro país, se puede considerar que un cerramiento vertical exterior suela estar formado generalmente por una hoja principal de albañilería cerámica ó bloque de hormigón, con un espesor que oscila entre 11,5 y 24 cm. Del mismo modo, requisitos constructivos y funcionales hacen necesario a su vez la colocación de otra hoja cerámica, con un espesor variable de 4 a 7 cm (ladrillo hueco), y a la disposición de una cámara de aire no ventilada de 2 a 4 cm de espesor entre ambas hojas.

Por otro lado, anejo a este espacio y según la necesidad de aislamiento térmico que requiera la adversidad climatológica del emplazamiento, se coloca además una capa de aislamiento térmico de entre 2 y 8 cm. El conjunto de todas estas capas son las que contribuyen a dotar al cerramiento de su resistencia térmica y prestaciones de ahorro energético.

Analizando diferentes configuraciones de cerramientos dentro de la casuística presentada (con un espesor total entre 21 y 42 cm), y de acuerdo a los tipos propuestos por el Catálogo de Elementos Constructivos del CTE, se obtiene la siguiente tabla donde se representa la influencia del material aislante térmico respecto a la resistencia térmica total existente en el propio cerramiento:

Composición del cerramiento (cm)	Influencia del aislante en R_T (%)
H. principal 11,5 + aislante 2 + doble hueco 7	41,95
H. principal 11,5 + aislante 4 + doble hueco 7	59,11
H. principal 11,5 + aislante 6 + doble hueco 7	68,44
H. principal 11,5 + aislante 8 + doble hueco 7	74,30
H. principal 11,5 + aislante 4 + doble hueco 4	67,68
H. principal 11,5 + aislante 6 + doble hueco 4	75,85
H. principal 11,5 + aislante 8 + doble hueco 4	80,73
H. principal 24 + aislante 2 + doble hueco 7	35,71
H. principal 24 + aislante 4 + doble hueco 7	52,63
H. principal 24 + aislante 6 + doble hueco 7	62,50
H. principal 24 + aislante 2 + doble hueco 4	42,17
H. principal 24 + aislante 4 + doble hueco 4	59,32
H. principal 24 + aislante 6 + doble hueco 4	68,62
H. principal 11,5 + aislante 2 + doble hueco 7 + cámara	36,85
H. principal 11,5 + aislante 4 + doble hueco 7 + cámara	53,86
H. principal 11,5 + aislante 6 + doble hueco 7 + cámara	63,65
H. principal 11,5 + aislante 2 + doble hueco 4 + cámara	43,77
H. principal 11,5 + aislante 4 + doble hueco 4 + cámara	60,88
H. principal 11,5 + aislante 6 + doble hueco 4 + cámara	70,01
H. principal 24 + aislante 2 + doble hueco 4 + cámara	37,01
H. principal 24 + aislante 4 + doble hueco 4 + cámara	54,03
H. principal 24 + aislante 6 + doble hueco 4 + cámara	63,81
H. principal 24 + aislante 2 + doble hueco 7 + cámara	31,94
H. principal 24 + aislante 4 + doble hueco 7 + cámara	48,42
H. principal 24 + aislante 6 + doble hueco 7 + cámara	58,48
Cerramiento tipo (promedio)	56,47 %

Tabla 1. Contribución de los materiales aislantes térmicos sobre la resistencia térmica total para las configuraciones de cerramientos verticales más habituales en España. (Fuente: [6])

De esta tabla se puede adoptar como valor de consenso que en torno a un 57% de la resistencia térmica ofrecida por el cerramiento se debe a los materiales aislantes, mientras que el 43% corresponde a los elementos de albañilería. Así pues, el valor del coeficiente de conversión de temperatura queda aproximado a:

$$f_{T(\text{promedio})} = (0,00475 * 0,57) + (0,002 * 0,43) = 0,0035675 K^{-1}$$

4.1.3 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN DE TEMPERATURA

Con los datos obtenidos anteriormente, la estimación final para el cálculo de este factor puede expresarse de forma general como:

$$F_T = e^{f_T * (T_2 - T_1)} = e^{0,0035675 * (T_{\text{med.cerramiento}} - 10)}$$

De este modo, y gracias a las simplificaciones realizadas, la conversión de la prestación térmica pasa a depender únicamente de la temperatura media en el cerramiento según la ubicación elegida.

4.2 APROXIMACIÓN AL FACTOR DE CONVERSIÓN DE HUMEDAD

La repercusión que genera este parámetro sobre la conductividad del material es sensiblemente más compleja que el caso anterior, debido a que la cantidad de agua almacenada es fuertemente dependiente de la naturaleza interna del material. Por ende, en similares condiciones de humedad relativa exterior, un material puede contener una cantidad de agua muy diferente a otro material, variando enormemente las propiedades térmicas.

De la misma forma que con el factor de temperatura, se van a establecer una serie de simplificaciones para que este factor de humedad solo dependa de las condiciones higrotérmicas, por lo que la solución aunque inexacta se aproxime mucho más al comportamiento real.

4.2.1 DIFERENCIA DE CONTENIDO DE HUMEDAD RESPECTO AL CTE

Dadas la temperatura y la humedad relativa en el exterior del cerramiento por la estación meteorológica, se procede al cálculo de la presión de saturación y de la de vapor, aplicando las relaciones psicométricas recogidas en el DA DB-HE/2 [7]:

$$P_{SAT\ cerr} = 610,5 * e^{\frac{17,269 * T_{med.cerr}}{237,3 + T_{med.cerr}}}$$

$$P_{V\ cerr} = P_{SAT\ cerr} * HR_{cerr}$$

A su vez, para las presiones en el interior, que se mantendrán constantes en todo momento, se toman las condiciones para una higrometría de clase 3 (característica de viviendas), que se sitúan en torno a 20°C y con una humedad relativa del 55%:

$$P_{SAT\ int} = 610,5 * e^{\frac{17,269 * 20}{237,3 + 20}} = 2,34\ kPA$$

$$P_{V\ int} = 2,34 * 0,55 = 1,29\ kPA$$

Por desgracia, el contenido de humedad en el aire interior del cerramiento no permite determinar directamente la cantidad de humedad contenida en el interior de los materiales del cerramiento. Este hecho se debe a que los mecanismos de transporte de humedad en los materiales tienden a acumular moléculas de agua en sus superficies porosas y a favorecer la condensación intersticial, aumentando el contenido de humedad de forma no lineal.

A su vez se producen fenómenos de histéresis (más acusados dependiendo del tipo de material), que tienden a retener humedad durante los procesos de secado. Estos se representan mediante curvas isotermas de sorción, las cuales exponen la relación entre la cantidad de agua en el material y la humedad relativa.

Dichas curvas son obtenidas en ensayos de laboratorio (UNE-EN ISO 12571:2015) [8], realizados a una temperatura constante de referencia de 23°C, por lo habitualmente que se carece de datos relativos para otras temperaturas. La temperatura incide en el proceso de almacenamiento de humedad, modificando la tensión superficial del agua y con ella la viscosidad del fluido y su presión capilar:

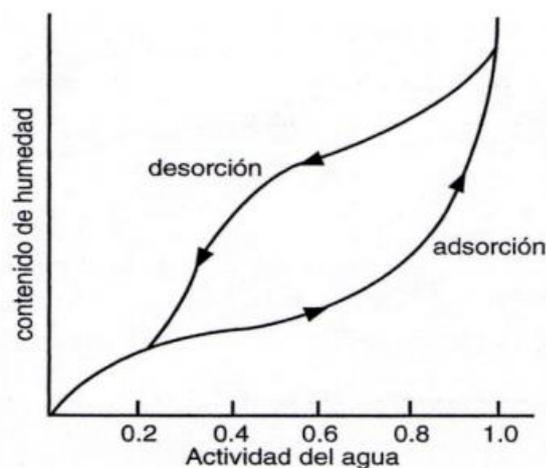


Figura 2. Curva isoterma de sorción característica. (Fuente: [9])

Por todo ello, determinar el contenido de humedad de los materiales a partir de la humedad relativa no es una medida lineal ni directa, sino fuertemente dependiente tanto del material como de su temperatura.

En la actualidad, se realizan ajustes matemáticos para que las curvas obtenidas en los ensayos mencionados anteriormente puedan ser recogidas en herramientas informáticas de cálculo higrotérmico (WUFI, MOIST, etc.).

Dada la carencia de curvas de sorción para otras temperaturas diferentes a 23°C, y para llevar a cabo la simplificación el método, se decide asumir que el material se comporta de forma similar a como lo hace a 23°C, siendo su curva constante a cualquier temperatura.

Analizando los rangos de variación de la humedad relativa media en las capitales de provincia de nuestro país, el intervalo entre 55 y 70% será el rango de mayor interés en las curvas de sorción de los materiales. En este rango las variaciones son poco acusadas, debido a fenómenos de adsorción multicapa, difusión de vapor en la matriz porosa y creciente condensación capilar. Por ello, resulta factible aplicar una interpolación lineal entre dichos valores.

Con el propósito de disponer para todos los materiales de unos valores de contenido de humedad referidos a una misma humedad relativa, se dispone de información basada en el modelo matemático propuesto por Künzel [10] y Krus, el cual utiliza como puntos de control el contenido en humedad correspondiente a una humedad relativa del 0% (w_0), del 80% (w_{80}), y del 95% (w_{95}).

Dado que el modelo de Künzel se ajusta en base a dos puntos muy próximos entre sí (w_{80} y w_{95}), y a un tercero situado en el origen (w_0), esto propicia que la curva de sorción real sea ligeramente superior al valor estimado por la aproximación.

Aprovechando que el valor w_{80} para diferentes materiales se encuentra disponible en diferentes bases de datos, como por ejemplo WUFI Light (Pro) [11], es posible realizar una interpolación lineal entre el valor de origen (w_0) y el valor conocido (w_{80}).

El error derivado de esta interpolación no será muy relevante en la gran mayoría de los materiales, por lo que esta aproximación lineal, a pesar de no ser exacta, sí permite establecer una valoración analítica de utilidad por su gran simplicidad:

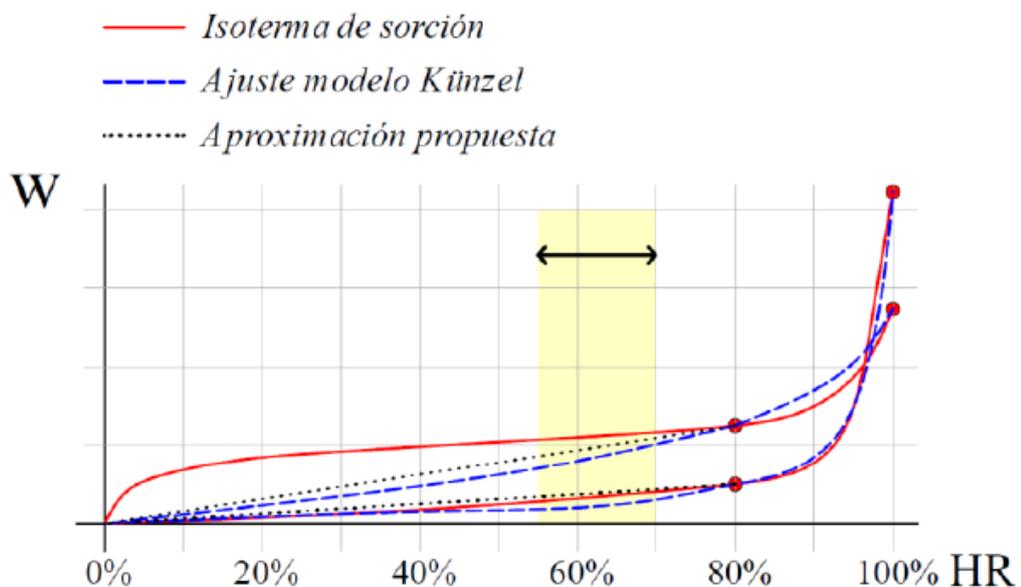


Figura 3. Representación del ajuste lineal propuesto para el rango de humedad relativa de interés (55-70%), a partir del valor de w_{80} aportado por bases de datos. (Fuente: Figura VI.9 de [12])

Para la estimación de un valor w_{80} representativo y general, se recogen en la siguiente tabla los datos relativos a materiales de construcción habitualmente utilizados en los cerramientos españoles.

Se ha calculado además un valor promedio sobre los mismos, tanto para la familia de los aislantes térmicos como para la familia de los elementos de albañilería, que se utilizará posteriormente en el factor promedio:

Material componente del cerramiento vertical	w_{80} (m^3/m^3)	w_{80} medio (m^3/m^3)
Lana Mineral (Roxul)	0,00020	0,005217
EPS genérico 20 kg/m3	0,00021	
XPS genérico 20 kg/m3	0,00021	
Tablero aislante de hormigón celular 95% porosidad	0,00450	
Tablero aislante de fibra de madera tratada (Pavatex)	0,01730	
Aislamiento de celulosa tratado (Isofloc)	0,00780	
Enlucido de yeso aislante genérico	0,00630	
Ladrillo macizo genérico 1900 kg/m3	0,00302	0,012870
Ladrillo macizo extrudido genérico 1650 kg/m3	0,00920	
Ladrillo hueco genérico 800 kg/m3	0,01300	
Ladrillo termoarcilla genérico 700 kg/m3	0,01700	
Ladrillo silicato de calcio genérico 1900 kg/m3	0,01800	
Hormigón genérico 2300 kg/m3 (agua/cemento 0,5)	0,08500	
Bloque de hormigón aligerado genérico	0,01700	

Tabla 2. Determinación aproximada del valor w_{80} para diferentes materiales aislamiento térmico y de albañilería, según aproximación de Künzel. (Fuente: Tabla VI.5 de [12])

A falta de estudios más específicos sobre los cerramientos verticales más comúnmente utilizados en España, puede adoptarse para el cálculo de una w_{80} promedio, y de forma análoga al procedimiento desarrollado anteriormente en el coeficiente de conversión de temperatura, que en torno a un 57% de la resistencia térmica proporcionada por la envolvente se debe a materiales aislantes, mientras que el porcentaje restante corresponde a albañilería:

$$w_{80}(\text{promedio}) = (w_{80}(\text{aislante}) * \%_{\text{aislante}}) + (w_{80}(\text{albañilería}) * \%_{\text{albañilería}})$$

$$w_{80}(\text{promedio}) = (0,005217 * 0,57) + (0,012870 * 0,43) = 0,0085779 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Este valor ponderado constituye una aproximación al valor de contenido de humedad en los cerramientos en unas condiciones de equilibrio a 80% de humedad relativa y 23°C, considerando el cerramiento uniforme y homogéneo.

A partir del mismo, se puede expresar la siguiente interpolación lineal para otros valores de humedad relativa a partir de una constante $m_{\text{genérica}}$:

$$w_{80}(\text{promedio}) = 0,0085779 = HR * m_{\text{genérica}}$$

$$m_{genérica} = \frac{W_{80} (promedio)}{HR_{80\%}} = \frac{0,0085779}{0,8} = 0,010634737$$

Con esta constante definida, se puede proceder al cálculo del contenido de humedad tanto en el exterior como en el interior, siendo este último a una humedad del 50% según CTE:

$$\psi_{med.cerramiento} = \psi_2 = HR_{cerr} * m_{genérica} = HR_{cerr} * 0,010634737$$

$$\psi_1 = HR_{50\%} * m_{genérica} = 0,5 * 0,010634737 = 0,0053175$$

Queda reflejado que el contenido de humedad en el interior se mantendrá uniforme en todo momento, mientras que el valor exterior dependerá de la humedad relativa registrada en el cerramiento.

4.2.2 COEFICIENTE DE CONVERSIÓN DE HUMEDAD

Una vez conocida la diferencia existente del contenido de humedad, es posible obtener este coeficiente de conversión (f_M) para cada material a partir de las tablas aportadas por la propia norma UNE-EN ISO 10456:2012. Hay que tener en cuenta que este valor depende de la sensibilidad del material al variar su conductividad por la acción del material, debido a sus características internas.

De la misma forma que se propuso para el cálculo del coeficiente de temperatura, se adopta un valor de consenso de 57% para materiales aislantes y el resto para elementos de albañilería.

Conociendo que para los aislantes térmicos el coeficiente de conversión de humedad varía entre 0,8 y 6 m^3/m^3 , siendo 3,4 m^3/m^3 un buen valor de consenso, y que para los materiales de albañilería oscila entre 4 y 10 m^3/m^3 , por lo que 7 m^3/m^3 proporciona igualmente una buena generalización, la estimación promedio para dicho coeficiente será de:

$$f_{\psi} (promedio) = (3,4 * 0,57) + (7 * 0,43) = 4,948 m^3/m^3$$

4.2.3 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN DE HUMEDAD

Finalmente, el cálculo de este factor de humedad puede expresarse como:

$$F_M = e^{f_{\psi}(\psi_2 - \psi_1)} = e^{4,948 * (\psi_{med.cerramiento} - 0,0053175)}$$

Al igual que con el factor de conversión de temperatura, este factor de humedad pasa a depender únicamente del contenido de humedad en el cerramiento.

4.3 DETERMINACIÓN DE LA PRESTACIÓN TÉRMICA DE DISEÑO

Aunando ambas aproximaciones analíticas por temperatura y humedad, se obtiene un factor corrector global que permite mejorar sustancialmente los cálculos utilizados en el ámbito térmico de la edificación española:

$$F_{corrector} = F_T * F_M$$

La conductividad y resistencia térmica prestacional de diseño para el cerramiento, aplicando el factor corrector, queda de la siguiente forma:

$$\lambda_{DISEÑO} = \lambda_{(CTE)} * F_{corrector} \qquad R_{T DISEÑO} = \frac{R_{T (CTE)}}{F_{corrector}}$$

Siendo:

$\lambda_{(CTE)}, R_{(CTE)}$ Conductividad y resistencia térmica definida por el CTE.

Con esta herramienta aplicada para la comunidad autónoma de Galicia pero extrapolable para todo el territorio español, se dispone de un sencillo método con el que obtener analíticamente las prestaciones térmicas que componen la envolvente edificatoria a partir únicamente de parámetros climatológicos de la zona.

Como ya se especificó en el alcance del proyecto, se van a determinar tres factores correctores para cada estación analizada: uno medio anual, otro máximo mensual, y un último mínimo mensual.

En el Anexo I aparece una tabla donde se recogen las estaciones analizadas y sus coordenadas geográficas, así como sus tres factores correctores obtenidos.

En el Anexo II aparecen fichas detalladas con los parámetros calculados en cada estación, así como una gráfica de la evolución anual del factor corrector medio.

5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA EN MAPA DE GALICIA DE LOS DATOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS

Como se definió en los objetivos, y para ayudar al proyectista en su tarea de diseño, se ha decidido elaborar un mapa general de Galicia en el que se incluya los factores correctores de cada uno de los puntos de las estaciones meteorológicas.

En la confección del mapa se hace uso del software Nemetschek Allplan 2012 [13], el cual utiliza coordenadas geográficas de las estaciones para generar una malla triangular en la que cada vértice se corresponda a un valor del factor de corrección.

Posteriormente, mediante una interpolación es capaz de realizar una representación con curvas de nivel uniendo los puntos de la malla equivalente.

Para dotar al proyectista de cálculos más personalizados, se elaboran tres mapas diferentes, incluidos en el Anexo III, con las siguientes características:

- *Mapa con factor medio anual de corrección:* propuesto como solución general, se elabora a través del promedio del factor obtenido en los 12 meses. Es el más indicado a la hora del proceso de diseño.
- *Mapa con factor máximo mensual de corrección:* se escoge el factor máximo mensual de cada estación, para obtener un mapa acorde a las exigencias energéticas más desfavorables a las que pueda estar expuesta la envolvente.
- *Mapa con factor mínimo mensual de corrección:* se escoge el factor mínimo mensual de cada estación, y aunque en el diseño no aporte nada útil, sirve para verificar el error cometido por el CTE, ya que incluso en este caso la aproximación de la prestación térmica es superior a la definida en la normativa (el factor corrector en este mapa es siempre superior a la unidad).

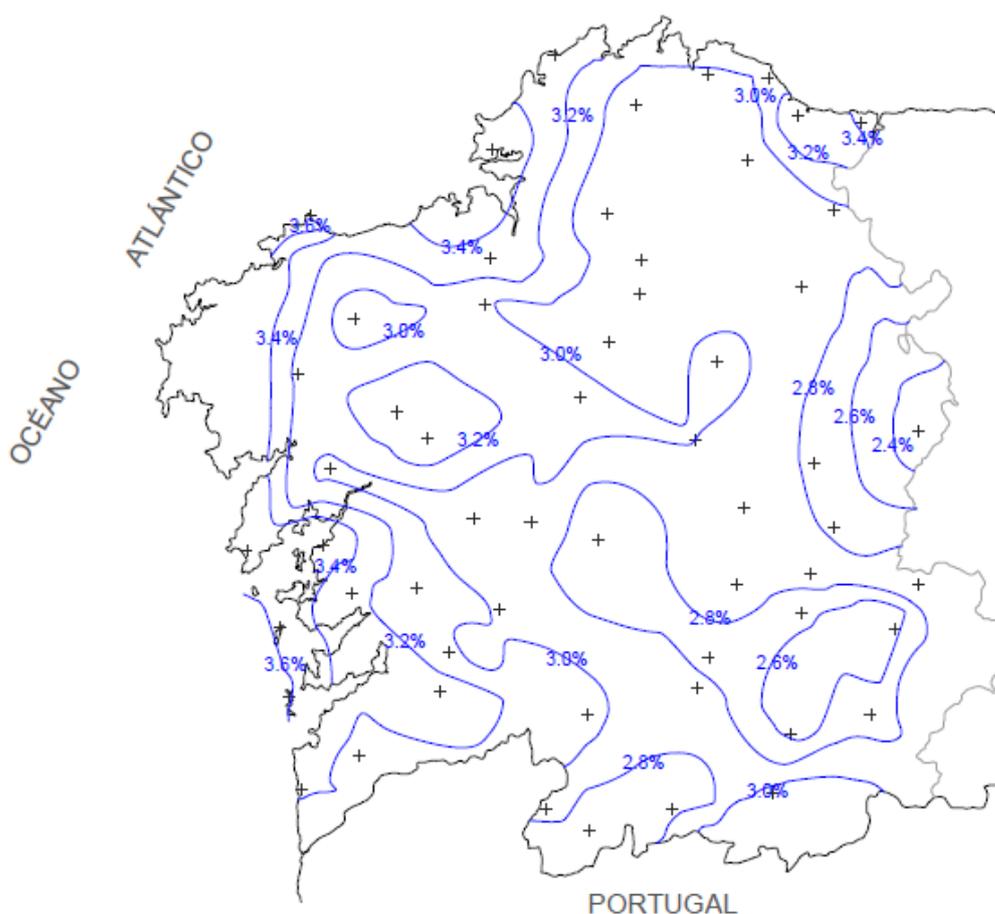


Figura 4. Mapa de Galicia con el porcentaje de factor de corrección medio anual aplicable para los valores de conductividad térmica en todo el territorio.

Galicia presenta un clima oceánico, cuyas características principales son la regularidad de precipitaciones durante todo el año y temperaturas suaves con baja oscilación anual. Las zonas costeras suelen sufrir vientos fuertes que traen consigo masas de aire húmedo que desembocan en lluvias. También cuenta con abundantes zonas montañosas, con temperaturas muy frías en invierno y suaves en verano.

Como se aprecia en el mapa, el porcentaje de factor corrector suele ser más elevado en zonas costeras, como A Coruña y Pontevedra, mientras que en zonas interiores el valor suele ser más bajo, como en Ourense y Lugo.

Para entender estos resultados es necesario evaluar el grado de relevancia que tiene la temperatura y la humedad relativa en el factor corrector final. Como se aprecia en el Anexo II, las temperaturas recogidas por las estaciones meteorológicas situadas en provincias cercanas a la costa son superiores a las del interior, mientras que la humedad relativa, al ser Galicia una comunidad autónoma donde se reparten

abundantes precipitaciones anuales a lo largo de toda su extensión, suele mantenerse en valores muy parecidos.

Este hecho hace que, en Galicia, la relevancia que presenta la temperatura sobre el parámetro de corrección es mayor que la de la humedad relativa. No hace falta añadir que en otra comunidad autónoma, con otro tipo de clima, podría producirse que el factor de humedad fuese el predominante.

Además, y combinando la información del mapa con las coordenadas y altitud que aparecen en el Anexo I, se observa que las estaciones situadas en zonas montañosas y elevadas, donde la temperatura baja drásticamente, registran un factor corrector menor que las mismas establecidas con cotas inferiores.

Como se puede observar en los otros dos mapas del Anexo III, los valores mantienen su concordancia y relación entre las diferentes zonas con respecto al mapa de la figura 4, obteniendo evidentemente valores más altos en el mapa del factor corrector máximo, y menores en el mapa del factor mínimo.

Por último, es importante comentar que la corrección máxima se ha obtenido en la estación de CIS Ferrol (A Coruña) en el mes de Agosto (con medias de 19,44°C y 80,65% de HR), siendo de un 4,49% de ajuste.

A su vez, la corrección mínima se ha producido en la estación de Ancares (Lugo) durante el mes de Febrero (con medias de 2,21°C y 77% de HR), dando un ajuste del 1,43%.

6. VERIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA

Para poder justificar la validez del método desarrollado, se va a elegir un tipo de cerramiento real, definido en el Catálogo de Elementos Constructivos (instrumento de apoyo del CTE), para sustituir así las propiedades térmicas de los materiales elegidos en las simplificaciones impuestas en los capítulos anteriores.

Tras esto se procederá al cálculo y comparación del valor de la resistencia térmica ofrecida por la fachada a partir de 3 criterios:

- el estipulado por el CTE (el menos preciso).
- el obtenido tras aplicar el factor corrector al valor del CTE.
- el que define la norma UNE-EN ISO 10456:2012 (el más riguroso).

Para poder confirmar que incluso con las condiciones más adversas el factor corrector supone un buen ajuste a la realidad, se ha decidido realizar el estudio en las estaciones meteorológicas donde se encuentran el factor corrector máximo y mínimo:

	Text (°C)	HRExt (%)	Fcorrector
CIS Ferrol (A Coruña)	19,44	80,65	1,0449
Ancares (Lugo)	2,21	77	1,0143

Tabla 3. Resumen de condiciones climáticas en las estaciones con mayor y menor factor corrector.

Se presenta a continuación el esquema del cerramiento escogido al azar en el propio Catálogo, así como una tabla con las hojas y características que lo conforman:

Código	Sección (mm)
F 1.1	<p style="text-align: center;">LC RM AT LH RI</p> <p style="text-align: center;">115 15 e_{AT} 70 15</p>

Figura 4. Cerramiento vertical seleccionado. (Fuente: Catálogo de Elementos Constructivos del CTE)

	Material seleccionado	e (mm)	λ (W / m ² K)
LC (fábrica de ladrillo cerámico)	Ladrillo perforado	115	0,35
RM (revestimiento intermedio)	Mortero para albañilería	15	0,4
AT (aislante no hidrófilo)	Poliestireno extruído (XPS)	60	0,04
LH (fábrica de ladrillo hueco)	Ladrillo hueco	70	0,32
RI (revestimiento interior)	Enlucido de yeso	15	0,4

Tabla 4. Resumen de los materiales y sus características que constituyen el cerramiento elegido.

A partir de estos datos, se calcula para el primer criterio la resistencia térmica total del cerramiento a través de la expresión designada en el CTE:

$$R_{T(CTE)} = \sum \frac{e_i}{\lambda_i}$$

Siendo e_i y λ_i el espesor y conductividad en cada capa.

Para el segundo criterio se emplea la ecuación definida en el capítulo 4.3, y aplicando los factores correctores de la Tabla 3 (máximo y mínimo), se obtiene la resistencia térmica del conjunto de las capas en serie que conforman el cerramiento:

$$\lambda_{DISEÑO i} = \lambda_{CTE i} * F_{corrector} \qquad R_{T(FC)} = \sum \frac{e_i}{\lambda_{DISEÑO i}}$$

El tercer y último criterio, ISO 10456:2012, es el más complejo y laborioso de todos ellos, ya que para poder llevarlo a cabo es necesario calcular los valores de temperatura, presión y humedad relativa existentes en el interior de cada una de las capas del cerramiento.

Para ello se hace uso del documento de apoyo DA DB-HE/2, en el que aparecen las relaciones psicométricas necesarias para la comprobación de la limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos.

El primer paso consiste en obtener las condiciones higrotérmicas tanto en el exterior como en el interior de la propia fachada. Los valores de temperatura y de humedad relativa exteriores utilizados aparecen en la Tabla 3. Para los datos en el interior, se vuelve a tomar las condiciones estipuladas por el DB-HE1 para viviendas, y que se sitúan en 20°C y 55% de humedad relativa.

Con estos datos, se obtiene la presión de saturación y la presión de vapor, ya sea en el exterior o en el interior, mediante las siguientes expresiones:

$$P_{sat} = 610,5 * e^{\frac{17,269*T}{237,3+T}} \qquad P_V = P_{sat} * HR$$

A partir de aquí es posible calcular la distribución de temperaturas en los extremos de las diversas capas que forman el conjunto del cerramiento:

$$T_n = T_{n-1} + \frac{R_n}{R_T} * (T_{int} - T_{ext})$$

Siendo:

T_n Temperatura en la capa correspondiente (°C).

T_{n-1} Temperatura en la capa anterior (°C).

R_n Resistencia térmica de la capa correspondiente (W / m²*K)

R_T Resistencia térmica total según el criterio del CTE (W / m²*K).

T_{int} Temperatura en el interior del cerramiento (20°C).

T_{ext} Temperatura en el exterior del cerramiento. (°C)

De forma simultánea, la distribución de presiones de vapor se halla a través de:

$$P_n = P_{n-1} + \frac{S_n}{S_T} * (P_{V\ int} - P_{V\ ext})$$

Siendo:

P_n Presión de vapor en la capa correspondiente (Pa).

P_{n-1} Presión de vapor en la capa anterior (Pa).

S_n Espesor de aire equivalente de la capa frente a la difusión de vapor (m).

S_T Espesor total de aire equivalente de las capas (m).

$P_{V\ int}$ Presión de vapor en el interior del cerramiento (Pa).

$P_{V\ ext}$ Presión de vapor en el exterior del cerramiento (Pa).

Las fórmulas para el cálculo de los espesores de aire se corresponden con:

$$S_n = e_n * \mu_n \qquad S_T = \Sigma S_n$$

Donde:

e_n Espesor de la capa (m).

μ_n Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua de cada capa. Se obtiene de la ISO 10456:2012, y sus valores aparecen en la Tabla 5. (-)

Con la temperatura, presiones y humedad relativa ya calculadas en cada extremo de las capas, el siguiente paso consiste en obtener un valor promedio para asumir el valor aproximado que se tiene en el punto medio de la capa.

Con la herramienta de cálculo higrotérmico WUFI, se buscan materiales en catálogos con características similares a los elegidos en el Catálogo del CTE, y a partir de ellos WUFI suministra curvas de sorción donde aparece la relación entre la humedad relativa en el medio de la capa y el valor de contenido de humedad correspondiente. Seguidamente, mediante una interpolación lineal con la humedad relativa en el medio de la capa, se obtiene el contenido de humedad ψ_2 . Para ψ_1 se debe tener en cuenta la estimación del 50% de HR en el interior que marca el CTE.

En el Anexo IV se recogen las curvas de sorción suministradas por WUFI de los materiales elegidos en la propia herramienta y similares a los del Catálogo.

Para obtener los coeficientes de conversión de temperatura y de humedad, f_T y f_ψ , aparecen en la propia norma ISO unas tablas con dichos valores para diferentes materiales. Los datos necesarios para el estudio se muestran a continuación:

	μ_n (-)	f_T (1/K)	f_ψ (m3/m3)
Ladrillo perforado	16	0,001	10
Mortero para albañilería	14,8	0,001	4
Poliestireno extruído (XPS)	125	0,0045	2,5
Ladrillo hueco	16	0,001	10
Enlucido de yeso	16	0,001	4

Tabla 5. Características necesarias de las capas de cerramiento elegidas para el cálculo a desarrollar según el criterio establecido por la Norma UNE EN-ISO 10456:2012.

Con todas las simplificaciones que se habían asumido en el capítulo 4 ya sustituidas por valores reales de los materiales que conforman el cerramiento, el último paso que requiere este tercer criterio consiste en calcular un factor corrector para cada material, proceder después al cálculo de la conductividad térmica correspondiente, y por último obtener el valor de resistencia térmica suministrado:

$$F_{corrector (ISO)} = F_T * F_M = e^{f_T * (T_{ext} - 10)} * e^{f_\psi * (\psi_2 - \psi_1)}$$

$$\lambda_{ISO} = \lambda_{material} * F_{corrector(ISO)}$$

$$R_{TOTAL (ISO)} = \sum \frac{e_i}{\lambda_{ISO i}}$$

En la siguiente tabla aparecen los valores de resistencia térmica según el criterio elegido para las dos estaciones elegidas, y la variación obtenida entre ellos:

	$R_{TOTAL} (W/m^2 * K)$			Variación CTE - ISO	Variación FC - ISO
	CTE	FCorrector	ISO		
CIS Ferrol (A Coruña) (FC Máximo)	2,122	2,031	2,039	3,91 %	0,39 %
Ancares (Lugo) (FC Mínimo)	2,122	2,092	2,098	1,14 %	0,28 %

Tabla 6. Comparación de los valores de resistencia térmica obtenidos según los tres criterios mencionados, así como la variación existente entre ellos.

En la tabla se ve claramente como gracias a la metodología desarrollada, con solo aplicar un simple factor corrector al criterio establecido actualmente por el CTE, se consiguen resultados de parámetros térmicos mucho más ajustados al procedimiento general y laborioso que se resume en la ISO 10456:2012.

La variación entre el método simplificado y la ISO, aunque existente, es cuanto menos poco significativa y relevante, pudiéndose por tanto dar validez al procedimiento obtenido en este proyecto.

7. ANÁLISIS DETALLADO DE LA FUNCIONALIDAD BAJO CONDICIONES ADVERSAS

Una vez verificada la eficacia de la herramienta de cálculo desarrollada a lo largo del documento, surge una última cuestión a tener en cuenta. En la Tabla 3 quedó reflejado que el factor corrector es más acusado conforme las condiciones de temperatura y de humedad relativa son más elevadas.

Esto da que pensar acerca de si el método prestacional elaborado sería capaz de realizar un ajuste óptimo en aquellos días del mes más calurosos. Por ello, se propone a continuación un estudio pormenorizado del caso.

De las estaciones analizadas, fue en CIS Ferrol (A Coruña) donde se obtuvo el parámetro máximo de 4,49% de corrección en el mes de Agosto. Dentro de los meses de Agosto analizados, que van desde el año 2006 hasta 2015, se comprueba que fue en 2010 donde se registró la temperatura media más elevada, de 20,2 °C.

Siguiendo las mismas directrices que en el proceso de búsqueda de los datos mensuales utilizados durante el proyecto, para este apartado se analiza dentro de los registros de Meteo Galicia cual es el día más caluroso de dicho mes, tratándose del 31 de Agosto de 2010, con una temperatura media diaria de 23,4°C.

Por último, y gracias a que la web contiene también los datos climáticos medios con variables diezminutales en un día concreto, se sigue el proceso completo de cálculo desarrollado durante el capítulo 4, solo que esta ocasión en vez de usar datos medios mensuales se hará lo propio con las mediciones medias diezminutales.

Los resultados obtenidos en este proceso para la estación CIS Ferrol, así como una pequeña comparativa con los alcanzados en el capítulo 4, aparecen en la siguiente tabla:

	FC Máximo	FC Medio	FC Mínimo
Datos mensuales	4,49 %	3,51 %	2,68 %
Datos diezminutales	5,53 %	4,62 %	4,02 %

Tabla 7. Comparativa de los factores de corrección obtenidos en CIS Ferrol.

En la siguiente gráfica queda reflejada la evolución que sigue el factor corrector a lo largo del día con la climatología más adversa:



Figura 5. Evolución diezminutal del factor corrector el 21-8-2010.

Se puede concluir por tanto que aunque la verificación del método en el capítulo 6 resultaba ser muy ajustada y óptima con respecto al criterio de análisis definido por la norma ISO, no resulta tan efectivo en días con condiciones extremadamente agresivas para el aislamiento de la envolvente del edificio.

Para hacer frente a las situaciones donde se produzcan esos posibles picos máximos, como el que se aprecia en la Figura 5 a las 13:50 horas, y que el método resulte funcional en horarios extremos que cubren desde el mediodía hasta el final de la tarde, resultaría adecuado establecer un coeficiente de seguridad sobre el propio factor corrector mensual obtenido, posibilitando cubrir esos máximos producidos.

Definiendo, por ejemplo, que dicho coeficiente de seguridad se sitúe en aproximadamente un 1,25, se podría garantizar la eficiencia del método en las peores circunstancias climatológicas para el cerramiento:

$$FC_{\text{corregido}} = FC_{\text{máx. mensual}} * C_{\text{seguridad}} = 4,49 * 1,25 = 5,61 > FC_{\text{máx. diezminutal}}$$

Este ajuste es meramente aproximativo, no exacto, pero si funcional para que el proyectista encargado del diseño tenga una herramienta adicional en la que poder ayudarse ante situaciones que lleven al límite el aislamiento del edificio. La necesidad de aplicar este coeficiente corrector, no hace sino demostrar todavía más la inadecuación de los valores de conductividad actualmente proporcionados por el CTE, y la necesidad de establecer correcciones funcionales, similares a las propuestas en este trabajo.

8. CONCLUSIONES

En la actualidad, el Documento Básico HE 1 (Limitación de la demanda energética), perteneciente al CTE, estima unos valores de temperatura y humedad relativa de diseño constantes, ignorando por completo el impacto que tiene la variación de las condiciones climatológicas en el cálculo de la prestación térmica ofrecida por los cerramientos en los edificios, y en general, optimistas respecto de su valor real.

La norma UNE-EN ISO 10456:2012 establece un proceso de cálculo para corregir el error cometido por el CTE, con la desventaja de que resulta demasiado complejo y laborioso para poder aplicarlo en el día a día.

Con el fin de solucionar este problema, se ha aplicado un procedimiento funcional y aproximado, basado en la ISO, que permita la corrección en el cálculo de la prestación térmica de los cerramientos utilizados en edificios de Galicia, siendo extrapolable a todo el territorio español.

Para conseguirlo, ha sido necesario definir un conjunto de simplificaciones que garanticen que el método dependa únicamente de las mediciones meteorológicas (temperatura y humedad relativa) que varían según la ubicación del edificio, ignorando en el proceso de cálculo los tipos de materiales que constituyen el cerramiento.

Desarrollada la metodología, se ha realizado un exhaustivo análisis de registros meteorológicos obtenidos en 57 emplazamientos de Galicia, con antigüedades siempre superiores a los 10 años. Con ello, se ha obtenido como resultado un factor corrector dependiente únicamente del clima de cada emplazamiento y que habrá que aplicar sobre la conductividad y resistencia térmica de diseño establecidas por el CTE.

A partir de esta herramienta se ha calculado el parámetro corrector a aplicar en un número significativo de estaciones meteorológicas situadas en Galicia, a través de sus registros de temperatura y humedad relativa mensuales, obteniendo como resultado que el factor corrector va a tener más relevancia en aquellas zonas costeras donde las temperaturas son más elevadas, mientras que en los emplazamientos del interior la corrección aplicada será menor.

Pensando en la funcionalidad del método para que el proyectista encargado del diseño pueda aplicarlo de forma rápida y con poca complejidad de cálculo, se ha optado por combinar los datos obtenidos en el cálculo anterior con una herramienta

CAD, generando unos mapas de la región gallega donde quedan caracterizados los factores de conversión en cualquier punto de región a través de la unión de isolíneas.

Sería también cuanto menos recomendable la opción de generar en un futuro este tipo de mapas que abarquen todo el territorio español, para posteriormente poder incluirlos en el Documento Básico HE 1.

En el proceso de búsqueda de las mediciones climáticas, se ha observado que cada comunidad autónoma cuenta con su organismo público particular, y que cada uno de ellos realiza el tratamiento de los datos de manera diferente. Por ello, sería importante conseguir que los datos climáticos estuvieran disponibles en formatos similares en los diferentes organismos autonómicos, o bien que dichos datos pudieran ser obtenidos de forma gratuita a través de la propia AEMET.

Para dar validez a la metodología, se ha escogido un tipo de cerramiento habitual en edificios españoles, y a partir del mismo se ha calculado su prestación térmica según tres criterios: el del CTE, el del factor corrector, y el de la ISO. Analizando y comparando los datos obtenidos, se ha comprobado que aplicando el factor de corrección se consiguen valores mucho más ajustados y próximos a la ISO (criterio más exigente), que los obtenidos con el CTE, avalando por tanto su eficacia.

Por último, se ha decidido estudiar la efectividad de la metodología cuando las condiciones climáticas son más adversas (altas temperaturas y HR). Para ello, se ha escogido la estación gallega con el mayor factor corrector, y dentro de la misma se ha elegido los datos diezminutales del día y mes más caluroso. Analizando los resultados, se ha visto que hay una variación que el propio factor no sería capaz de corregir de manera óptima, por lo que aplicar un coeficiente de seguridad a dicho factor sería la solución más funcional para cubrir esos momentos más extremos para el cerramiento.

Como análisis personal, la elaboración de este TFG me ha resultado muy positiva ya que me ha aportado conocimientos en normas y procedimientos relacionados con el ahorro de energía y que se utilizan diariamente (hasta el momento solo había profundizado mínimamente en el CTE).

Además, lo que más valoro ha sido descubrir la importancia y dificultad que tiene ajustar un trabajo de esta envergadura de forma concisa y breve.

Para finalizar, y como apasionado de la energía térmica, energías renovables, edificación, materiales, etc., me gustaría en un futuro tener la oportunidad de encontrar un puesto de trabajo relacionado con alguna de ellas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aislamiento de Fachadas: Soluciones ISOVER (Saint-Gobain) para Obra Nueva y Rehabilitación.
- [2] Documento Básico HE 1. Limitación de la demanda energética. Septiembre 2013. Ministerio de Fomento.
- [3] AENOR UNE-EN ISO 10456:2012. Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño.
- [4] Consejería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia. www.meteogalicia.es
- [5] Catálogo de Elementos Constructivos del CTE. CAT-ECv6.3 (Marzo 10). Ministerio de Vivienda.
- [6] Pérez-Bella, J.M., et. al. A correction factor to approximate the design thermal conductivity of building materials. Application to Spanish facades. Energy and Buildings 88 (2015), 153-164.
- [7] DA DB-HE/2. Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos. Octubre 2013. Ministerio de Fomento.
- [8] UNE-EN ISO 12571:2015. Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica.
- [9] Badui Dergal, Salvador. Química de los Alimentos. 5ª edición, 2013.
- [10] Hartwig M. Künzel. Simultaneous heat and moisture transport in building components. 1995.
- [11] WUFI Light (Pro). Wärme and Feuchte instationär. Moisture transport in building materials. <https://wufi.de/en/>
- [12] Pérez Bella, J.M. Parametrización de exposición a la humedad y de los ensayos de estanqueidad en cerramientos de edificación. Caracterización prestacional de su comportamiento higrotérmico. Tesis Doctoral. Noviembre de 2012.
- [13] Allplan 2012. Nemetschek Allplan GmbH, Munich. <https://campus.allplan.com>